基于稳定同位素的兰州市南北两山土壤水入渗模式

钟晓菲[1,2]， 张明军[1,2]， 张 宇[1,2]， 王家鑫[3]， 刘泽琛[1,2]， 谷来磊[1,2]

（1. 西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室，甘肃 兰州 730070；3. 西北农林科技大学资源环境学院，陕西 杨凌 712100）

摘 要：基于2018年4—10月兰州市南北两山不同海拔高度的降水和土壤水同位素数据，运用*lc*-excess法和*lc*-excess平衡方程定量分析兰州市南北两山的土壤水入渗过程，结果表明：土壤水*lc*-excess显示研究区土壤水入渗补给过程中活塞流模式和优先流模式并存，7—8月，各采样点均出现优先流信号，*lc*-excess平衡方程表明活塞流模式对深层土壤水的贡献率约70%，而优先流的贡献率约30%。土壤含水量和土壤水*lc*-excess呈正相关关系，南北两山土壤水*lc*-excess在月尺度和深度上均无显著差异，表明南北两山深层土壤水入渗补给模式一致，均来自上层土壤水渗流的活塞流模式，但在植被覆盖率较高的南山，优先流模式出现较多，尤其在降水集中的7—8月。本文研究结果为认识兰州市南北两山黄土丘陵区的水文过程提供理论参考。

关键词：稳定同位素；*lc*-excess法；活塞流；优先流；兰州市南北两山

水是生命存在不可或缺的资源，土壤水是水资源的重要组成部分，在生态系统中发挥着重要作用[1-2]，入渗是土壤水运移的重要形式，也是连接地表水和地下水的桥梁[3]，早期土壤水的研究主要以均质土壤的理想状况为主，在理想状态下土壤水逐层向下渗流，土壤基质起到过滤的作用。1980年以后，由于在地下水质监测中广泛的发现了本应被土壤基质过滤掉的农药和其他污染物质，使得土壤水优先流成为了研究的热点内容，优先流的提出标志着对土壤的研究由均质土壤转向了非均质土壤[4]。近年来，用水矛盾使土壤水入渗补给地下水机制的研究成为了热点内容之一，量化不同入渗模式对地下水补给的贡献率对评估地下水资源的数量和质量至关重要[5]，但对于地下水埋藏较深的干旱半干旱地区，不同入渗模式对深层土壤水的补给过程也至关重要。

20世纪60年代以来，稳定同位素技术因其安全、无污染等诸多优点被广泛应用[6]，近年来，随着土壤水抽提技术的不断发展进步，稳定同位素技术在示踪土壤水入渗过程和土壤水补给来源方面进一步展现了独特的优势[7-9]。国内外一些学者研究发现在不同降水事件下，不同深度土壤水同位素组成有明显差异，由此提出了活塞流和优先流两种土壤水入渗模式，活塞流模式下土壤水中新水推动旧水缓慢向土壤深层推进，而优先流模式下土壤中的新水借助快速通道在短时间内可以到达土壤深层[10-12]；此外，研究表明土壤水中活塞流和优先流模式存在同时发生的可能[13]，但也会因外界环境的影响，导致土壤水入渗补给模式发生变化，例如不同的降雨强度、不同的土地利用类型以及不同的地表状况等[14-15]。在关于土壤入渗的研究中，一方面与传统技术相比，同位素技术能够示踪水分的运动路径；另一方面由于土壤水入渗过程的复杂性，量化土壤水入渗补给量仍存在一定的难度。近年来，有学者将土壤水和降水的同位素组成与贝叶斯混合模型（MixSIAR）结合起来量化了活塞流模式和优先流模式对地下水的相对贡献率[16-17]，但是与贝叶斯混合模型相比，*lc*-excess平衡方程操作简便，且计算结果与贝叶斯混合模型一致。

兰州市位于黄土高原西部边缘地区，由于其自然环境和其所处地理位置，生态环境较为脆弱[18]。20世纪50年代开始，随着兰州市南北两山绿化工程

收稿日期：2023-05-07； **修订日期**：2023-08-05
基金项目：国家自然科学基金项目（41771035）资助
作者简介：钟晓菲（1995-），女，硕士研究生，主要从事寒旱区生态水文过程研究. E-mail: zhongxiaofei00@163.com
通讯作者：张明军. E-mail: mjzhang2004@163.com

的建设,生态环境在一定程度上得到了恢复[19],但是也突出了兰州市南北两山的用水矛盾,因此,对兰州市南北两山土壤水入渗过程的研究具有重要意义,然而前人在兰州市南北两山的土壤水入渗研究多以传统方法为主[20-21],对于土壤水入渗过程而言,同位素技术可以揭示水分在土壤中的运移过程,鉴于此,本文基于兰州市南北两山用水现状,选取了南山和北山不同海拔高度观测点的降水、土壤水同位素数据,对土壤水入渗过程进行研究,探讨兰州市南北两山土壤水入渗的模式和不同模式对深层土壤水的贡献率,为认识兰州市黄土丘陵区的水文过程提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

兰州市南北两山(35°34′~37°07′N,102°35′~104°34′E)地处我国黄土高原西部[22],区内地势整体西南高东北低,市区平均海拔约1500 m[23]。研究区深居内陆,以温带半干旱大陆性季风气候为主,夏无酷暑冬无严寒,降水较少且主要集中在夏季,四季分明,多年平均气温7.4 ℃,多年平均降水量312.9 mm[24-25]。区内土壤以灰钙土为主,且大多在黄土母质的基础上发育而成,南山多为暗灰钙土和典型灰钙土,北山多为淡灰钙土和红沙土;区内植被覆盖率较低,种类单一,地表植被主要由旱生和盐生植物组成[26]。

在兰州市北山选择海拔相对较低的采样点保利领秀山,将其定义为N1,再选择海拔相对较高的采样点机场西侧,将其定义为N2;在兰州市南山选择海拔相对较低的采样点任家庄,将其定义为S1,再选择海拔相对较高的采样点兰炼造林场,将其定义为S2,如表1所示。

1.2 数据来源

1.2.1 样品采集 样品于2018年4—10月08:00—11:00在均一地表状况下(裸地)采集。土壤样品采集,按月尺度在采样地内挖掘深度为120 cm的土壤剖面,以10 cm为间隔分层采集土壤样品,每层采集4个平行样,其中两个平行样分别装入自带的铝盒中用于测量土壤含水量(SWC),另外两个平行样装入10 mL的实验玻璃瓶中密封用于测量氢氧稳定同位素值,样品收集好后带回进行分析。

降水样品采集,将标准雨量桶放置在每个采样地用来收集降水样品,在每次降水结束后,立即将水样装入50 mL的HDPE塑料瓶中,并用Parafilm封口膜密封,避免因为蒸发导致同位素数据出现误差,带回实验室进行分析。

气象数据来源,气温、降水量、相对湿度数据均来自中国气象数据网(http://data.cma.cn)提供的永登(机场西侧)和皋兰(保利领秀山)的逐小时观测数据,在使用时将小时数据处理为日数据带入计算;其中兰炼造林场和任家庄的数据来自于兰州市气象局提供的兰州站气温、降水、相对湿度数据。

1.2.2 样品测定 所有样品在西北师范大学地理与环境科学学院稳定同位素实验室进行,土壤样品采用北京理加联合公司开发的LI-2100全自动低温真空抽提系统,真空度控制在1 Pa·s^{-1}以下,加热温度为105 ℃,抽提时间为3 h。并随机选择一部分样品在抽提结束后分别称重来确保抽提效率>98%。水样使用Los Gatos Research公司生产的液态水同位素分析仪DLT-100,每个样品均进针6次,其中前两针数据考虑到同位素的记忆效应予以剔除,后四针数据取平均值作为水体同位素的测量值。测量出的δ^2H和δ^{18}O的丰度以相对于维也纳标准平均海洋水(Standard Mean Ocean Water,SMOW)的千分差来表示:

$$\delta = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1\right) \times 1000‰ \tag{1}$$

式中:R_{sample}为样品中^{18}O/^{16}O和^{2}H/^{1}H的比值;R_{standard}为SMOW中^{18}O/^{16}O和^{2}H/^{1}H的比值。δ^2H和δ^{18}O的测量精度分别为±0.3‰和±1‰。以上样品数据均由团队

表1 采样点信息

Tab. 1 Sampling point information

采样点		海拔/m	经度	纬度
兰州市北山	保利领秀山(N1)	1578.90	103.73°E	36.10°N
	机场西侧(N2)	1992.90	103.60°E	36.49°N
兰州市南山	任家庄(S1)	1649.20	103.72°E	36.04°N
	兰炼造林场(S2)	1710.10	103.62°E	36.07°N

成员采集和测定[27]。

1.3 *lc*-excess法 Line-conditioned excess(*lc*-excess)方法,是用数学方法表达氢氧稳定同位素比之间的关系,当水体经历了冷凝等化学平衡的水文过程时*lc*-excess值通常表现为正值,当水体经历了蒸发等不平衡的水文过程时*lc*-excess值通常呈现负值,根据定义可知局地大气降水的*lc*-excess值一般大约为0[28-29],计算公式如下:

$$lc\text{-}excess = \delta^2\mathrm{H} - \alpha\delta^{18}\mathrm{O} - b \tag{2}$$

式中:α为局地大气水线(LMWL)的斜率;b为LMWL的截距。LMWL是根据当地降水的氢氧稳定同位素值拟合而成:δ^2H=(6.82±0.38)δ^{18}O+(2.59 ± 2.54)(R^2=0.88,P<0.05)。

1.4 *lc*-excess平衡方程

土壤水入渗补给时,活塞流模式和优先流模式的氢氧稳定同位素组成通常会出现明显的差异[30],因此可以利用双组分同位素质量平衡来计算活塞流和优先流的相对贡献比例[31],公式如下:

$$f_{活塞流} = \frac{lc_{深层土壤水} - lc_{优先流}}{lc_{活塞流} - lc_{优先流}} \tag{3}$$

式中:$f_{活塞流}$为活塞流模式的相对贡献率,由$f_{活塞流}+f_{优先流}=1$可计算优先流的贡献率。$lc_{深层土壤水}$选取土壤垂直剖面中100~120 cm的土壤水*lc*-excess值;$lc_{优先流}$选取明显出现优先流信号的当月降水*lc*-excess值;$lc_{活塞流}$选取出现活塞流信号的采样点土壤水*lc*-excess值。

1.5 数据处理

运用Origin软件分析各采样点土壤含水量、土壤水*lc*-excess值和土壤水氢氧稳定同位素的差异,并运用单因素方差分析(ANOVA)法对数据进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量变化

在土壤垂直剖面(0 cm、20 cm、40 cm、60 cm、80 cm、100 cm)中,不同采样点土壤含水量在月尺度和土壤垂直剖面深度上存在变化(图1),其中N1点由于外部因素的影响,致使4月土壤水数据缺失。从整体来看,北山的土壤含水量高于南山(北山:5.61%,南山:3.98%),其中NI、N2、S1、S2的平均土壤含水量分别为4.26%、6.96%、2.82%、5.14%,同一海拔高度的土壤含水量N1>S1、N2>S2;在40~60 cm处存在较为明显的变化,其中北山N2点4月和7月土壤含水量变化幅度较大(4月:4.27%~16.53%,7月:3.66%~12.60%),4月60~100 cm的土壤含水量(10.77%)高于0~40 cm的土壤含水量(4.75%),7月则呈现出相反的情况(60~100 cm:5.16%,0~40 cm:9.25%),北山N1点8月和9月0~40 cm土壤含水量明显高于其他月份;南山S1和S2土壤含水量均在9月最高(S1:8.70%,S2:16.37%),但在60~100 cm范

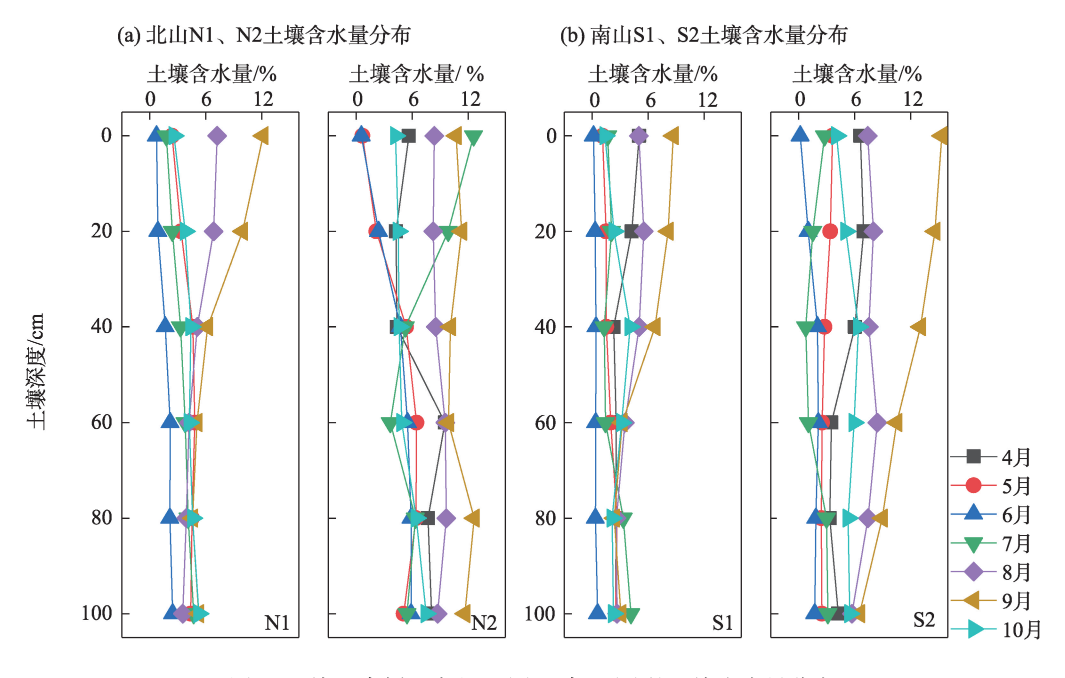


图1 土壤垂直剖面中北山(a)和南山(b)的土壤含水量分布

Fig. 1 The distribution of soil water content in North hills (a) and South hills (b) in the vertical profile of soil

围内的土壤含水量明显不同,S2在8月、9月、10月的土壤含水量高于S1。

研究区的降水主要集中在7月和8月(图2),分别占全年降水的85.60%和51.30%,其中最大降水量出现在8月21日的降水事件中,单次降水量达43.2 mm;土壤含水量对降水的响应具有滞后性,根据月累积降水量和月均土壤含水量的变化趋势,月累积降水量的高值出现在7月(84.90 mm)和8月(65.70 mm),而月均土壤含水量的高值出现在8月(6.370%)和9月(8.78%)。降水稳定同位素的δ^{2}H和δ^{18}O的变化趋势基本一致,5月降水氢氧稳定同位素最富集(δ^{2}H:−17.65‰,δ^{18}O:−3.39‰),8月最贫化(δ^{2}H:−57.36‰,δ^{18}O:−8.90‰)。4—10月,7月月均温最高(23.60℃),相对湿度在8月达到峰值(66.70%)。

2.2　土壤水稳定同位素特征

在时间尺度上,不同采样点土壤水中δ^{18}O和δ^{2}H的变化趋势一致(图3),从整体来看,采样点的土壤水同位素的最大值出现时间不一,但最小值均出现在8—9月,据图3可知,土壤水同位素最小值的出现受降水同位素贫化的影响。北山的土壤水同位素组成(δ^{2}H:−37.05‰,δ^{18}O:−1.33‰)整体比南山的土壤水同位素组成(δ^{2}H:−40.03‰,δ^{18}O:−2.69‰)略微偏正,其中各采样点的氢氧稳定同位素组成分别为:N1(δ^{2}H:−31.04‰,δ^{18}O:−0.22‰)、N2(δ^{2}H:−43.06‰,δ^{18}O:−2.43‰)、S1(δ^{2}H:−40.63‰,δ^{18}O:−2.45‰)、S2(δ^{2}H:−39.43‰,δ^{18}O:−2.94‰)。N1点和N2点相比,6月和9月土壤水同位素在60~80 cm的范围内有明显差异,N1点土壤水同位素在8月最贫化,6月最富集;N2点在40~100 cm范围内的9月土壤水同位素值最贫化,且明显区别于其他月份。S1点和S2点相比,8月、9月、10月土壤水同位素值在土壤垂直剖面上有明显差异,其中S1点土壤水同位素值在9月最贫化且明显区别于其他月份,S2点则是8—10月土壤水同位素值最贫化且明显区别于其他月份。

在空间尺度上,在土壤垂直剖面中随着深度的增加,δ^{2}H和δ^{18}O逐渐贫化,反之,越接近地表,δ^{2}H和δ^{18}O越富集的变化特征;此外,在月尺度上80~100 cm的土壤水同位素组成更加趋于稳定,而0~40 cm的土壤水稳定同位素组成差异较大。在0~40 cm的范围内,北山变化与南山相比较小,N1(δ^{2}H:−44.42‰~−11.00‰,δ^{18}O:−3.98‰~7.56‰)、N2(δ^{2}H:−52.68‰~−20.38‰,δ^{18}O:−6.35‰~6.65‰)、S1(δ^{2}H:−73.87‰~−10.98‰,δ^{18}O:−10.04‰~6.05‰)、S2(δ^{2}H:−61.38‰~−7.60‰,δ^{18}O:−8.99‰~4.95‰)。在60~100 cm范围内,南北两山的变化区别不明显,N1(δ^{2}H:−52.24‰~−7.33‰,δ^{18}O:−5.42‰~6.11‰)、N2(δ^{2}H:−71.74‰~−33.07‰,δ^{18}O:−9.47‰~−0.59‰)、S1(δ^{2}H:−75.22‰~−27.84‰,δ^{18}O:−11.20‰~1.16‰)、S2

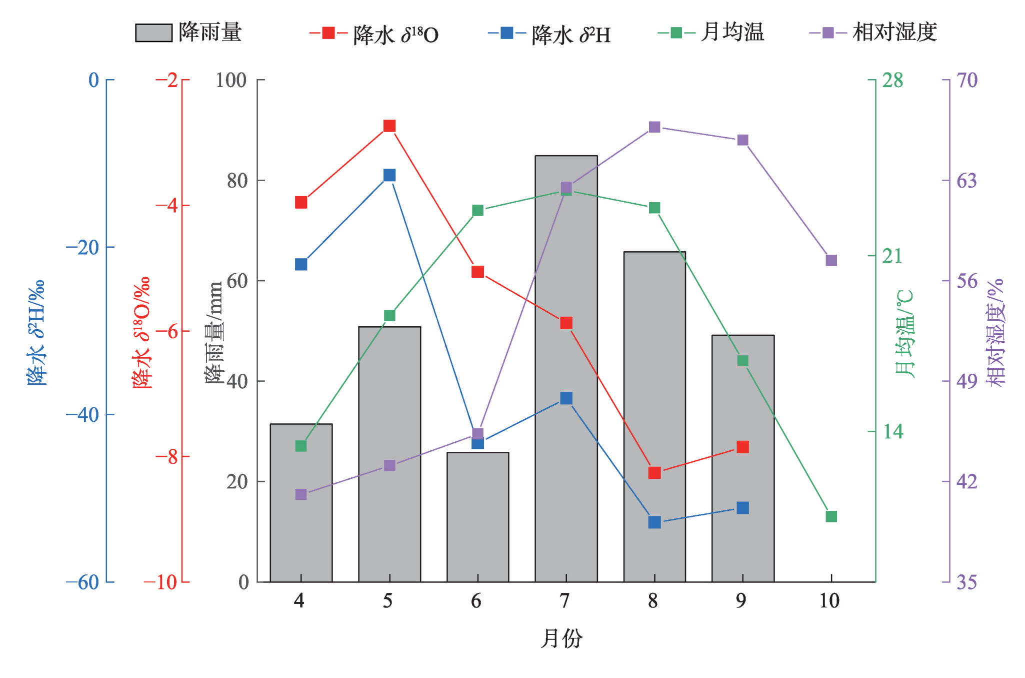


图2　气象要素和降水稳定同位素

Fig. 2　Meteorological elements and stable isotopes of precipitation

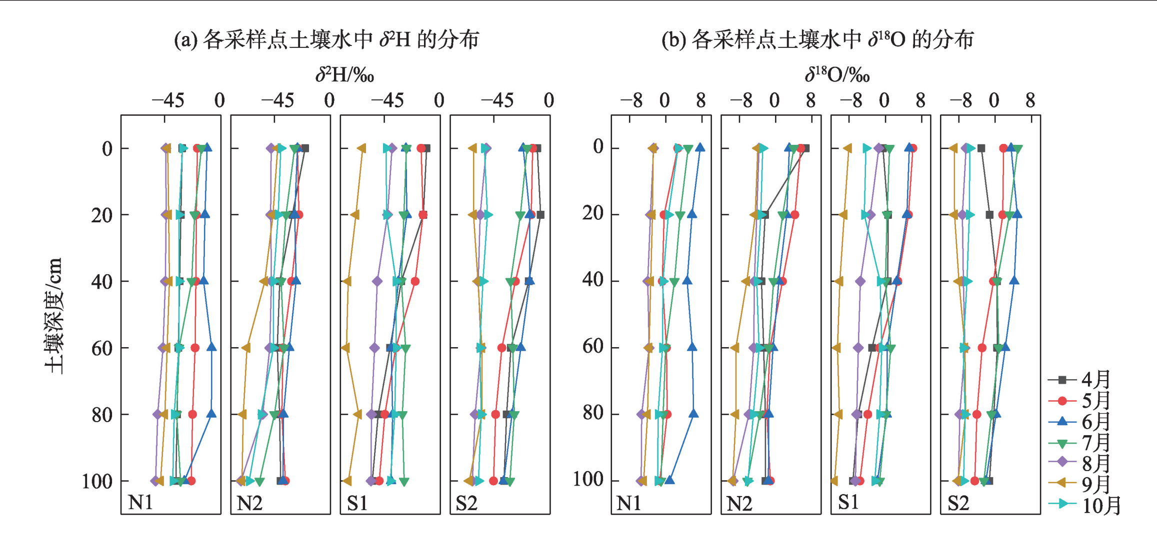


图3 土壤垂直剖面中δ^2H(a)和δ^{18}O(b)的分布

Fig. 3 Distribution of δ^2H (a) and δ^{18}O (b) in vertical soil profile

(δ^2H:−64.71‰~−23.50‰,δ^{18}O:−8.22‰~2.20‰)。

2.3 土壤水 *lc*-excess 指示土壤水入渗过程

当活塞流模式发生时,土壤水呈层状缓慢向深层推进,在这一过程中,土壤中新水推动旧水向下运动,新水与旧水发生混合较多[32],而当优先流模式发生时,土壤水可借助土壤中的大孔隙等通道快速向土壤深层推进,这一过程中新水与旧水发生混合较少[33],因此土壤水同位素组成越接近降水,说明新水与旧水发生的混合越少,而土壤水同位素组成与降水区别越大,说明新水与旧水发生的混合越多[34-36]。

在时间尺度上(图4),研究区土壤水 *lc*-excess 值表明土壤水经历了入渗补给和蒸发分馏的交替作用,8—9月 *lc*-excess 接近正值,说明这一时间段土壤水受到新水的入渗补给作用;5—6月 *lc*-excess 更加偏负,说明这一时间段土壤水以蒸发分馏作用为主;但是4月土壤水 *lc*-excess 变化幅度最大(除N1点外),且S1和S2在0 cm位置土壤水最接近降水,说明此时南山土壤水受到降水入渗补给,新水还未与土壤中的旧水发生混合;但是N2在0 cm的位置数值偏负,而20 cm的位置数值接近降水,说明N2先受到降水入渗补给作用,且水分快速到达20 cm

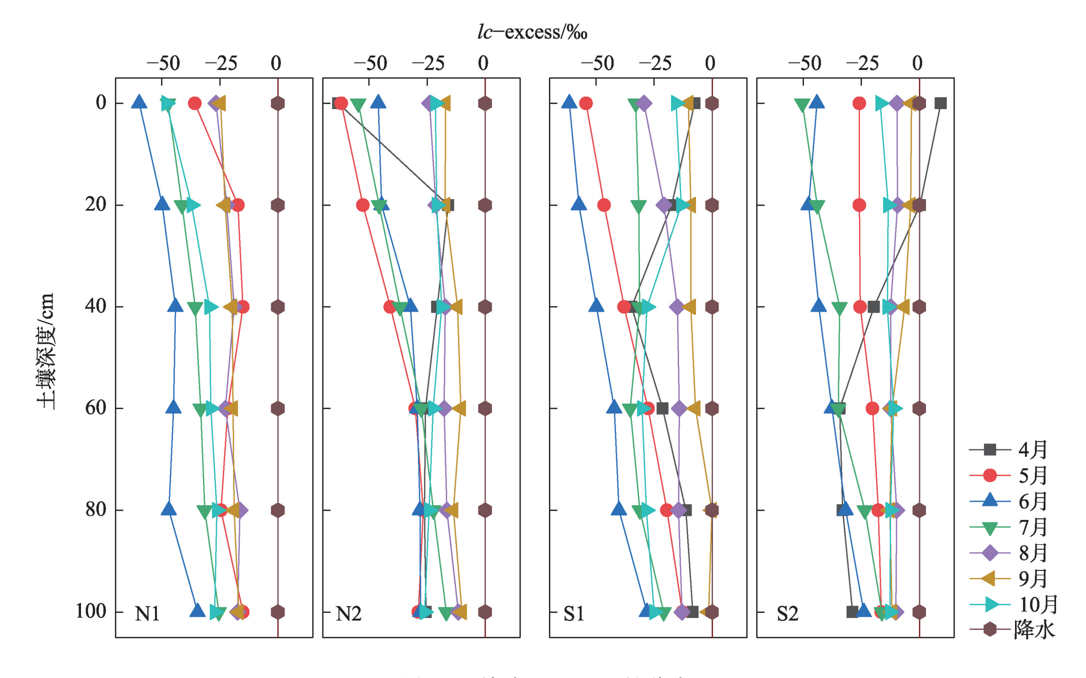


图4 土壤水 *lc*-excess的分布

Fig. 4 Distribution of *lc*-excess of soil water

的位置，然而其后强烈的蒸发作用导致0 cm位置数值偏负；此外，9月土壤水*lc*-excess最接近降水，说明9月土壤中新水较多，与土壤中原有的旧水发生混合较少；从4—10月的时间段上来看，S1和S2在4月、8月和9月出现了明显的优先流信号，与之相比，N1和N2在8月和9月的优先流信号较弱。不同月份南山的土壤水*lc*-excess变化幅度大于北山，但南山的土壤水*lc*-excess更接近降水，说明南山出现的优先流信号多于北山。在空间尺度上，土壤水*lc*-excess变化整体上呈现出随着土壤深度的增加，土壤水*lc*-excess变幅减小且逐渐接近正值的变化特征，其中0~40 cm的土壤水*lc*-excess变化幅度明显大于40~100 cm。南山土壤水*lc*-excess变化幅度整体比北山更大，尤其在0~40 cm的范围内更加明显。

为更清晰地观察土壤水*lc*-excess值在土壤垂直剖面上的变化，依据土壤水含水量的变化特征和土壤水同位素组成的变化特征将土壤垂直剖面深度划分为0~40 cm和40~100 cm两个范围。从时间尺度来看，4—6月土壤水*lc*-excess值波动较大且更偏向负值，结合土壤含水量发现此时土壤水分受蒸发分馏作用损失较多；7—9月土壤水*lc*-excess值逐渐偏正，结合土壤含水量发现此时土壤水开始累积。从空间尺度来看，结合土壤水稳定同位素组成的变化发现，0~40 cm的土壤水受蒸发分馏和入渗补给的影响变化幅度较大，而40~100 cm的土壤水则较为稳定。通过观察前一个月0~40 cm的土壤水*lc*-excess信号与下一个月40~100 cm的土壤水*lc*-excess信号的关系（图5），发现N1、N2和S2在7—8月出现优先流信号，而S1在6—7月出现优先流信号，其他月份皆为活塞流信号。

运用土壤水*lc*-excess信号定性分析兰州市南北两山土壤水入渗过程，发现活塞流模式在兰州市南北两山发生较多，然而南山的优先流模式信号多于北山。根据*lc*-excess平衡方程定量分析活塞流模式和优先流模式对深层土壤水的相对贡献率（表2），结果表明研究区土壤水入渗以活塞流模式为主；但低海拔的N1点和S1点的优先流模式对深层土壤水的贡献率均高于高海拔的N2点和S2点，说明海拔的高低会影响土壤水的入渗过程。

3　讨 论

通过比较月降水量、月平均气温、相对湿度和土壤含水量等要素与土壤水入渗指示信号*lc*-excess的关系[37]，发现只有土壤含水量与其相互关系最紧密（图6），二者呈现正相关关系[38]，说明土壤水入渗补给使得土壤含水量增加；40~100 cm土层的土壤含水量和土壤水*lc*-excess的相关性均高于0~40 cm土层，表明40~100 cm土层的土壤水主要受到上层降水入渗补给为主，且受到蒸发分馏的影响比0~40 cm土层的土壤水小。通过运用单因素方差分析检验南北两山土壤水*lc*-excess值在土壤垂直深度上的差异[39]，结果显示，在0.05置信水平下，南山和北山的土壤水*lc*-excess值总体均值并非显著的不同，说明在土壤水入渗过程中，南北两山均以单一降水补给的活塞流入渗模式为主，深层土壤水的补给源主要来自上层土壤水渗流的活塞流模式补给，因此二者同位素组成相似。这一结果与前人的研究一致，根据在黄土高原地区展开的关于土壤水入渗补给研究中，大量研究表明土壤水入渗过程中，降水是浅层地下水唯一的补给来源[40]，且活塞流模式占主导地位，但黄土高原地区存在双重渗透机质，即活塞流模式和优先流模式并存[41-43]。

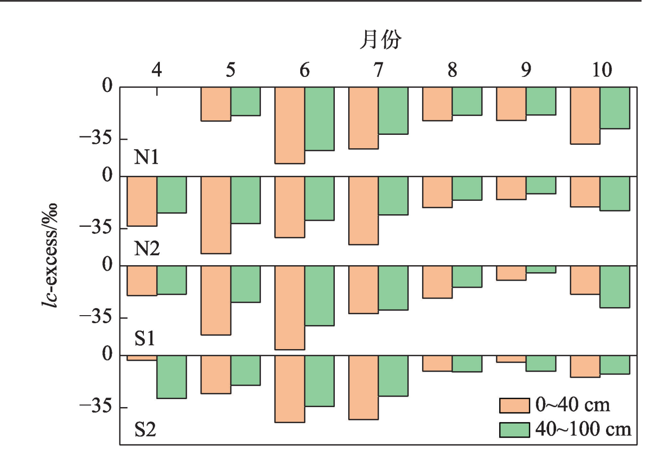


图5　不同深度土壤水*lc*-excess在不同时间的分布

Fig. 5　The distribution of soil water *lc*-excess in different depths at different times

表2　活塞流和优先流模式对深层土壤水的相对贡献率

Tab. 2　The relative contribution rate of piston flow and preferential flow model to deep soil water

采样地	$f_{活塞流}$/%	$f_{优先流}$/%
N1	73	27
N2	77	23
S1	60	40
S2	75	25

在兰州市南北两山的土壤水入渗过程中，南山出现明显的优先流信号多于北山。根据前人的研

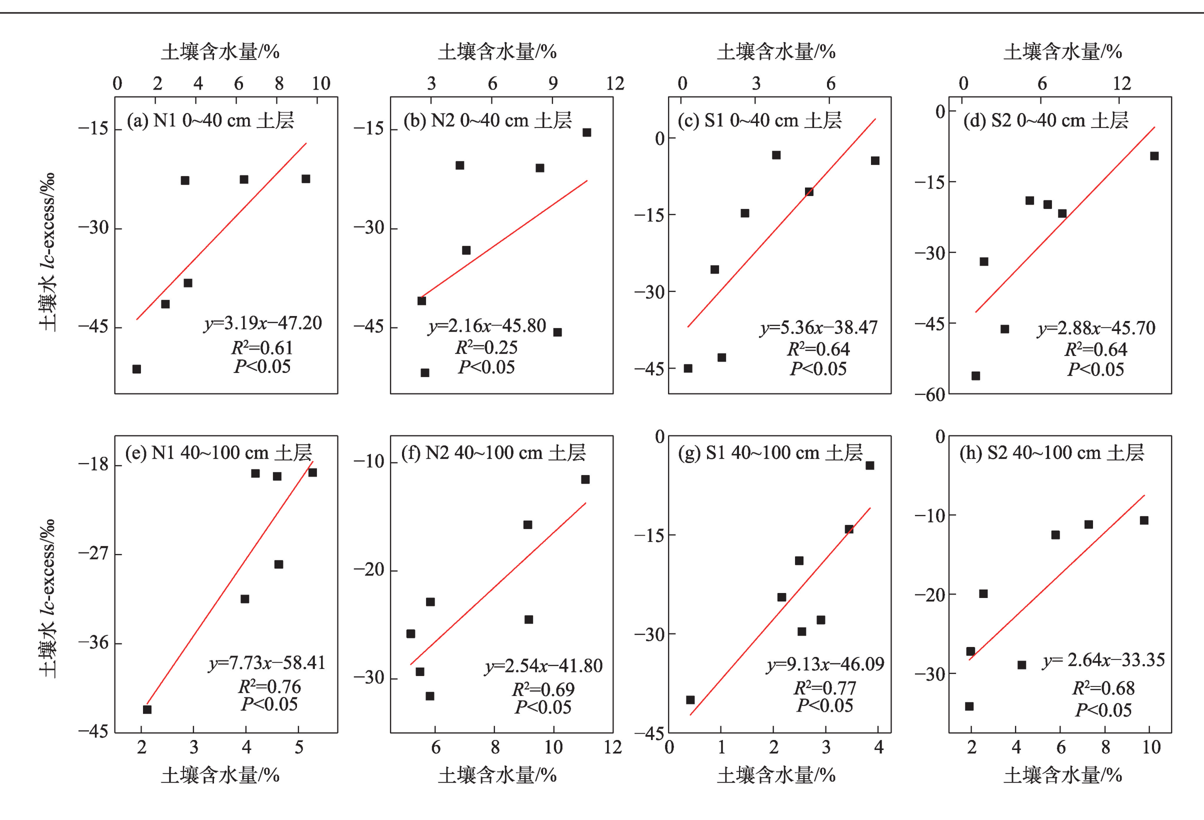


图6 土壤水 *lc*-excess值和土壤含水量的线性拟合

Fig. 6 Linear fitting of soil water *lc*-excess value and soil water content

究，黄土高原地区的景观和流域范围内存在优先流模式主导入渗补给过程[44]，而少数强降雨事件(≥25 mm·d^{-1})产生的径流在地形低点汇集也有利于优先流的发生[17]；此外，土壤中存在孔隙、裂纹、裂隙等优先通道也会导致优先流的发生[45-46]；南山位于阳坡，光热条件优于北山，有利于乔木的生长，因此南山的林地和灌木面积占比较大[47]，植被根系的生长在南山土壤中留存了较多的通道，使南山的优先流信号多于北山。

4 结 论

(1) 研究区土壤含水量整体上北山高于南山，各采样点的土壤含水量在月尺度和深度上存在变化，各月份土壤含水量均以40~60 cm深度为界限，其上、其下存在明显变化；研究区降水集中在7—8月，降水稳定同位素在5月最富集，8月最贫化。

(2) 土壤水稳定同位素δ^{18}O和δ^{2}H变化趋势一致，北山土壤水同位素值比南山土壤水同位素值略微偏正；各采样点土壤水同位素的最小值均出现在8—9月；随着土壤剖面深度的增加，土壤水稳定同位素逐渐贫化且趋于稳定，0~40 cm土壤水同位素组成变化较大且不稳定，80~100 cm土壤水同位素组成更稳定。

(3) 土壤水 *lc*-excess 显示，在4—6月土壤水经历了较为强烈的蒸发分馏作用，在7—9月，土壤水以补给入渗为主；在土壤垂直剖面上呈现出随着深度的增加，土壤水 *lc*-excess 变幅减小且逐渐接近正值的变化特征，与北山相比，南山的土壤水 *lc*-excess 更接近降水；研究区土壤水补给入渗存在双重渗透模式，整体上以活塞流模式为主，6—8月优先流信号出现较多，且南山的优先流信号多于北山，低海拔的优先流贡献率高于高海拔，土壤含水量与土壤水 *lc*-excess 呈正相关关系。

参考文献(References)：

[1] García-Tejero I F, Durán-Zuazo V H. Plant water use efficiency for a sustainable agricultural development[J]. Agronomy, 2022, 12(8): 1806.

[2] Yao Y, Liu Y, Zhou S, et al. Soil moisture determines the recovery time of ecosystems from drought[J]. Global Change Biology, 2023, 29(13): 3562-3574.

[3] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 311-318. [Lei Zhidong, Hu Heping, Yang Shixiu.

Progress and review of soil water research[J]. Advances in Water Science, 1999, 10(3): 311-318.]

[4] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils[J]. Water Resources Research, 1982, 18(5): 1311-1325.

[5] McCallum J L, Dogramaci S, Bai A, et al. Assessing temporal changes in groundwater recharge using spatial variations in groundwater ages[J]. Water Resources Research, 2020, 56(8): e2020WR027240.

[6] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: Perspectives from stable isotope composition[J]. Plant, Cell & Environment, 1992, 15(9): 1073-1082.

[7] Gazis C, Feng X. A stable isotope study of soil water: Evidence for mixing and preferential flow paths[J]. Geoderma, 2004, 119(1-2): 97-111.

[8] Sprenger M, Herbstritt B, Weiler M. Established methods and new opportunities for pore water stable isotope analysis[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(25): 5174-5192.

[9] 徐英德, 汪景宽, 高晓丹, 等. 氢氧稳定同位素技术在土壤水研究上的应用进展[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 1-9, 15. [Xu Yingde, Wang Jingkuan, Gao Xiaodan, et al. Advances in application of hydrogen and oxygen stable isotope techniques in soil water research[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3): 1-9, 15.]

[10] Mathieu R, Bariac T. An isotopic study (^{2}H and ^{18}O) of water movements in clayey soils under a semiarid climate[J]. Water Resources Research, 1996, 32(4): 779-789.

[11] 程立平, 刘文兆. 黄土塬区几种典型土地利用类型的土壤水稳定同位素特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 651-658. [Cheng Liping, Liu Wenzhao. Soil water stable isotope characteristics of several typical land use types in the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23 (3): 651-658.]

[12] McDonnell J J. The two water worlds hypothesis: Ecohydrological separation of water between streams and trees [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2014, 1(4): 323-329.

[13] Letz O, Siebner H, Avrahamov N, et al. The impact of geomorphology on groundwater recharge in a semi-arid mountainous area[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 127029.

[14] Pu H, Song W, Wu J. Using soil water stable isotopes to investigate soil water movement in a water conservation Forest in Hani Terrace[J]. Water, 2020, 12(12): 3520.

[15] Du K, Zhang B, Li L. Soil water dynamics under different land uses in loess hilly region in China by stable isotopic tracing[J]. Water, 2021, 13(2): 242.

[16] 郑双科, 司炳成, 张志强, 等. 黄土塬区苹果园降雨入渗机制[J]. 应用生态学报, 2017, 28(9): 2870-2878. [Zheng Shuangke, Si Bingcheng, Zhang Zhiqiang, et al. Rainfall infiltration mechanism of apple orchard in loess tableland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(9): 2870-2878.]

[17] Xiang W, Si B C, Biswas A, et al. Quantifying dual recharge mechanisms in deep unsaturated zone of Chinese Loess Plateau using stable isotopes[J]. Geoderma, 2019, 337: 773-781.

[18] Dong J, Zhang Z, Liu B, et al. Spatiotemporal variations and driving factors of habitat quality in the loess hilly area of the Yellow River Basin: A case study of Lanzhou City, China[J]. Journal of Arid Land, 2022, 14(6): 637-652.

[19] 向定龙. 1949年以来兰州南北两山绿化问题研究[D]. 兰州: 西北民族大学, 2021. [Xiang Dinglong. Research on the Greening of the North and South Mountains in Lanzhou Since 1949[D]. Lanzhou: Northwest University for Nationalities, 2021.]

[20] 刘小娥, 苏世平, 李毅. 兰州市南北两山典型灌丛土壤理化性质[J]. 草业学报, 2021, 30(6): 28-39. [Liu Xiao'e, Su Shiping, Li Yi. Physicochemical properties of typical shrub soil in north and south mountains of Lanzhou[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(6): 28-39.]

[21] 苏世平, 刘小娥, 李毅. 兰州市南北两山不同灌丛土壤渗透特性[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 149-154, 163. [Su Shiping, Liu Xiaoe, Li Yi. Soil infiltration characteristics of different shrubs in the north and south mountains of Lanzhou[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5): 149-154, 163.]

[22] 党瑜. 试论兰州市地理环境与城址的历史变迁[J]. 中国历史地理论丛, 2000, 16(2): 143-154. [Dang Yu. Discussion on the historical changes of geographical environment and city site in Lanzhou[J]. Journal of Chinese Historical Geography, 2000, 16(2): 143-154.]

[23] 李吉均, 方小敏, 马海洲, 等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起[J]. 中国科学: 地球科学, 1996, 1(4): 316-322. [Li Jijun, Fang Xiaomin, Ma Haizhou, et al. Late Cenozoic geomorphic evolution of the upper reaches of the Yellow River and the uplift of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Scientia Sinica(Terrae), 1996, 1(4): 316-322.]

[24] 肖洪浪, 段争虎, 宋耀选, 等. 黄土高原西部兰州市郊植被的水环境响应[J]. 中国沙漠, 2006, 25(4): 517-521. [Xiao Honglang, Duan Zhenghu, Song Yaoxuan, et al. Water environment response of vegetation in the suburbs of Lanzhou, western Loess Plateau[J]. Journal of Desert Research, 2006, 25(4): 517-521.]

[25] 王友生, 高伟东, 王多尧. 兰州市1957—2011年气候变化特征及规律分析[J]. 人民黄河, 2015, 37(10): 18-20. [Wang Yousheng, Gao Weidong, Wang Duoyao. Climate change characteristics and regularity analysis of Lanzhou City from 1957 to 2011[J]. Yellow River, 2015, 37(10): 18-20.]

[26] 钟芳, 赵瑾, 孙荣高, 等. 兰州南北两山五类乔灌木林草地土壤养分与土壤微生物空间分布研究[J]. 草业学报, 2010, 19(3): 94-101. [Zhong Fang, Zhao Jin, Sun Ronggao, et al. Study on the spatial distribution of soil nutrients and soil microorganisms in five types of arbor-shrub forests in north and south mountains of Lanzhou[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(3): 94-101.]

[27] 车存伟, 张明军, 王圣杰, 等. 基于氢氧稳定同位素的兰州市南北两山土壤蒸发时空变化及影响因素研究[J]. 地理研究,

2020, 39(11): 2537- 2551. [Che Cunwei, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Study on spatial and temporal changes and influencing factors of soil evaporation in the north and south mountains of Lanzhou City based on hydrogen and oxygen stable isotopes[J]. Geographical Research, 2020, 39(11): 2537-2551.]

[28] Landwehr J M, Coplen T B. Line-conditioned excess: A new method for characterizing stable hydrogen and oxygen isotope ratios in hydrologic systems[C]// International Conference on Isotopes in Environmental Studies, IAEA Vienna, 2006, 132-135.

[29] Sprenger M, Tetzlaff D, Soulsby C. Soil water stable isotopes reveal evaporation dynamics at the soil-plant-atmosphere interface of the critical zone[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(7): 3839-3858.

[30] Liu H, Tang J, Chen L, et al. Threshold recognition for shallow groundwater recharge by precipitation using dual isotopes in a small subtropical hilly catchment[J]. Catena, 2022, 213: 106186.

[31] 向伟. 基于稳定同位素的黄土高原区域尺度土壤蒸发和地下水补给研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021. [Xiang Wei. Study on Regional Scale Soil Evaporation and Groundwater Recharge in the Loess Plateau based on Stable Isotope[D]. Yangling: Northwest University of Agriculture and Forestry, 2021.]

[32] Zimmermann U, Münnich K O, Roether W, et al. Tracers determine movement of soil moisture and evapotranspiration[J]. Science, 1966, 152(3720): 346-347.

[33] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils revisited [J]. Water Resources Research, 2013, 49(6): 3071-3092.

[34] Jasechko S, Taylor R G. Intensive rainfall recharges tropical groundwaters[J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(12): 124015.

[35] Cuthbert M O, Taylor R G, Favreau G, et al. Observed controls on resilience of groundwater to climate variability in sub-Saharan Africa[J]. Nature, 2019, 572(7768): 230-234.

[36] Wang J, Zhang M, Argiriou A A, et al. Recharge and infiltration mechanisms of soil water in the floodplain revealed by water-stable isotopes in the Upper Yellow River[J]. Sustainability, 2021, 13 (16): 9369.

[37] Cohen I, Huang Y, Chen J, et al. Pearson correlation coefficient[J]. Noise Reduction in Speech Processing, 2009, 2: 1- 4. doi.org/10.1007/978-3-642-00296-0_5.

[38] Zhao Y, Dai J, Tang Y, et al. Illuminating isotopic offset between bulk soil water and xylem water under different soil water conditions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 325: 109150.

[39] Wahid Z, Latiff A I, Ahmad K. Application of one-way ANOVA in completely randomized experiments[C]// Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2017, 949(1): 012017.

[40] Huang T, Pang Z, Liu J, et al. Groundwater recharge mechanism in an integrated tableland of the Loess Plateau, northern China: Insights from environmental tracers[J]. Hydrogeology Journal, 2017, 25(7): 2049-2065.

[41] Yang Y, Fu B. Soil water migration in the unsaturated zone of semiarid region in China from isotope evidence[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(3): 1757-1767.

[42] Huang T, Ma B, Pang Z, et al. How does precipitation recharge groundwater in loess aquifers? Evidence from multiple environmental tracers[J]. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124532.

[43] Zhao Y, Wang L. Determination of groundwater recharge processes and evaluation of the ‘two water worlds’ hypothesis at a check dam on the Loess Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2021, 595: 125989.

[44] Li Z, Chen X, Liu W, et al. Determination of groundwater recharge mechanism in the deep loessial unsaturated zone by environmental tracers[J]. Science of the Total Environment, 2017, 586: 827-835.

[45] Marquart A, Eldridge D J, Geissler K, et al. Interconnected effects of shrubs, invertebrate-erived macropores and soil texture on water infiltration in a semi-arid savanna rangeland[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(16): 2307-2318.

[46] Zheng Y, Chen N, Yu K, et al. The effects of fine roots and arbuscular mycorrhizal fungi on soil macropores[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 225: 105528.

[47] 高凤霞, 韩惠. 西部半干旱区兰州市南北两山森林生态效益评估[J]. 生态科学, 2021, 40(6): 106-115. [Gao Fengxia, Han Hui. Ecological benefit assessment of forests in the north and south mountains of Lanzhou City, semi-arid region of western China[J]. Ecological Science, 2021, 40(6): 106-115.]

Soil water infiltration process in north and south mountains of Lanzhou City based on stable isotope

ZHONG Xiaofei[1,2], ZHANG Mingjun[1,2], ZHANG Yu[1,2],
WANG Jiaxin[3], LIU Zechen[1,2], GU Lailei[1,2]
(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2. Key Laboratory of Oasis Resources Environment and Sustainable Development of Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Based on precipitation and soil water isotope data at different elevations in the north and south mountains of Lanzhou from April to October 2018, the *lc*-excess method and the *lc*-excess equilibrium equation were used to qualitatively and quantitatively analyze the soil water infiltration process in this area. The infiltration process of soil water, indicated by the soil water *lc*-excess value, was verified by correlation analysis and single factor analysis. The results showed that there are obvious variations in soil water content in the study area on a monthly scale and at different depths, with loss dominating from April to June and accumulation dominating from July to September. The soil water content in the high altitude areas was found to be greater than that in the low altitude areas, and the soil water content in the north mountains was found to be greater than that in the south mountains. Stable isotopes of soil water at each sampling site we found to be most depleted from August to September. At increasing soil depth, soil water isotopes showed a trend of gradual depletion and stabilization. The soil water *lc*-excess results showed that the piston flow mode and the priority flow mode co-exist in the infiltration and recharge process of soil water in the study area. The priority flow signal appeared at all sampling sites from July to August. The contribution of the preferred flow pattern to deep soil water was higher at the low elevation sampling sites than at the high elevation sampling sites. The soil water content and soil water *lc*-excess were found to be positively correlated. The monthly scale and depth of soil water *lc*-excess were not significantly different between the north and south mountain, indicating that the infiltration and recharge patterns of soil water in the north and south mountains are the same, and that both are dominated by the piston flow infiltration pattern of precipitation recharge. However, in the south mountains, where there is greater vegetation cover, the preferential flow pattern signal appeared more often, especially in July and August, when precipitation is concentrated. Based on the soil water infiltration and replenishment processes in the north and south mountains, it the selection of salt- and drought-tolerant, shallow-rooted shrubs and perennial grasses is recommended for the north mountains, while reasonable irrigation is recommended in the south mountains during the plant growing season (from April to June). The results of this study provide a theoretical reference for understanding the hydrological process in the north and south mountains of Lanzhou.

Keywords: stable isotope; *lc*-excess method; piston flow; preferential flow; north and south mountains of Lanzhou